ミニホットスポット簡易検出法と対処法

ver. 2012.5.9

＜著者＞
新田伸也（筑波技術大学・宇宙物理学 [相対論的プラズマ物理]）
大嶋晃敏（国立天文台・宇宙線物理学：測定者）

＜協力者＞
牧野淳一郎（東工大・ 宇宙物理学 [重力多体問題]）
三好真（国立天文台・電波天文学 [VLBI]）
匿名のシニア学者

概 要

3 月の福島第一原子力発電所事故以来、放射能汚染について様々な情報がマスメディア・ネット等で流れています。政府等の当初の発表は福島県の一部以外の汚染は深刻なものではない、というものでしたが、栃木県、千葉県、茨城県などの一部に市町村程度の広がりをもつ「ホットスポット」と呼ばれる高レベル汚染地域が広がっていることが明らかになり、また住民やボランティア科学者による自主的な調査、文部科学省のサーベイにより、他都県でもホットスポットの存在が明らかになりました。

「ホットスポット」までいたらない地域においても、雨水による濃縮を経て、驚く程高濃度に汚染された局所領域「ミニホットスポット」が多数形成されてしまっています。ミニホットスポットは、通常数十 cm 四方程度の広がりしかないために、通常行われている地上高 1m の線量率測定だけでは見落としてしまう事に注意してください。1m の線量率が低くても、危険が無い訳ではありません。そこに高濃度の放射性物質がむきだしになっていれば、体についた放射性物質を経口で取り込んだり、舞い上がった埃を呼吸で取り込む事で簡単に内部被曝してしまいます。ミニホットスポットを検出し、適切な対策をとらないと、全く気が付かないうちに外部被曝・内部被曝してしまう危険があるのです。

しかし、見方を変えれば、自然の力で放射性物質が集められているのですから、集中して対策を取ることで効果的に地域全体の放射線の危険を減らすことができます。

この資料は、地域住民、自治体がが自主的にミニホットスポットを検出し、対策するための参考となる情報を提供するためにまとめたものです。以下では、市販のハンディタイプ線量計と物差しだけでミニホットスポットを検出する効果的な方法と、除染方法、汚染土壌を一時的保管する方法を提案し、それらの根拠を解説します。

本資料は、新聞取材に対応すべく急造したものです。未だ完成度は十分ではないと思います。今後も改訂版を掲載する可能性がありますので、改訂による上記 ver. 日付変更にも注意してください。

まとめ

以下の解説は長い上に、やや専門的な部分も有るので、本論の前に、ここで重要部分の簡潔なまとめをしておきます。本資料の対象としている用語「ミニホットスポット」とは何かについては第1章を参照してください。

・ミニホットスポット検出法

まず、高精度かつ高感度なハンディタイプ線量計を手に入れます。調査したい生活圏の中央部分（学校や公園の中央）で地上高1mの線量率を測定します（この値をAとする)。線量計にヒモをつけて、立った状態で手首から下げて、測定部分が地上高10cm程度になるようにします。線量計をガンマ線を検出した時にビープ音がなる設定にします。そのまま線量計を下げた状態で、生活圏を限無く散策します。ビープ音の時間間隔が狭まって来たら、そこが高線量率の領域です（図1参照)。目視で注意深く見回し、ミニホットスポット候補地を探します。

ミニホットスポット候補地で、地上高5cmと1mの２つの高さで線量率を測定します（5cmでの値をB、1mでの値をCとする)。この２つの高さで測ることがポイントです。A、B、Cの値を比較する事でミニホットスポットの広がりが見積もれます（図2、表1参照)。このようにして、ミニホットスポットの広がりを確認してから除染作業をします。この検出法の詳細とその根拠は第2章に記載してあります。我々のwebサイト（http://tsukuba-invest.sakura.ne.jp/）の別資料「図解！ミニホットスポット検出法」も参照してください。

今回の改訂では、巻末付録に於いて除染対象とするミニホットスポットのBによる判断基準を見直す検討をしています。こちらもご覧下さい。

・ミニホットスポット除染法

必要最小限の除染を安全に注意して行う事が大切です。線量計を使って、事前にミニホットスポットの広がりを確認し（第2章参照)、まず深さ3cm程度だけ土壌をはぎ取ります。再度線量計で地上高5cm線量率を測定し、効果を確認します。周囲のミニホットスポット外の5cm線量率と同程度であれば、それで十分です。もしまだ線量率が周囲よりも高いようでしたら、さらに数cmはぎ取ります。除染と効果確認を繰り返し、必要最小限の除染に留めましょう。大量に取りすぎると汚染土壌の保管が大変になります。一度除染しても、雨期を経過すると再び同じ場所がミニホットスポットになる可能性があります。雨期が終わるごとに調査して、除染を繰り返す努力が必要です。何シーズンか除染を繰り返す事で、その地域の放射線性物質を減らして行く事が出来るのです。

除去した汚染土壌の収納には、出来るだけポリタンクのような水を透さない丈夫な密封容器を用います。一般に使われている土嚢袋では、雨水とともに除染した放射性物質が溶け出たり、土壌微粒子が漏れたりする可能性があります。また、取り去った土壌を除染地付近で一時保管した後、後に行政機関の管理施設に移動する際にも、移動させ易くなります。しっかりした密封容器に封じ込めてしまえば、その除染した土壌からそれ以後に内部被曝する危険はもう無くなるのです。

除染作業中についた汚れを体内に取り込まないよう、細心の注意を払ってください。除染時の服装についての注意は、多くの除染マニュアルに記載されています。特に汚れを飲食時に口から取り込むことを避けるため、除染作業途中の飲食は論外で、除染後は飲食の前に必ず入浴し、使った服もすぐ洗濯するか廃棄しましょう。作業中に呼吸とともに放射性微粒子を吸い込まないようにしてください。そのためには、花粉症予防等に用いる市販の外科用マスクでは全く不

十分です。工業規格に合格した防塵マスクを使ってください（現段階で最高性能を持つ「N100規格」に合格した防塵マスクを推奨、第3章参照)。

・汚染土壌保管法

除染した汚染土壌を密封容器に封入したら、とりあえず除染場所付近でしばらく保管する事になるでしょう。できるだけ早く行政機関管理の処分場に移したい所ですが、どの自治体でも処分場の確保が難航しています。容器に密封すれば、保管の際の危険は外部被曝のみです。なるべく人の立ち入らない倉庫や地下室に保管し、周囲を水入りポリタンクで囲ったり、汚染されていない土壌が豊富に有るなら土嚢で囲ったりして放射線遮蔽します。住宅の庭や公園の一角に保管する際には、なるべく生活空間から離れた場所で地面に容器ごと埋設します。上から水入りポリタンクで蓋をするのも良いでしょう（埋設場所の目印にもなります)。保管場所を決めたら、まず、保管場所に一番近い生活空間での線量率を測定します。実際に汚染土壌を保管場所に設置した後、保管場所に一番近い生活空間での線量率を再度測定し、線量率の増加がわずかであるか、変化が測定できない位小さい事を確認してください。もし、線量率が顕著に上がっているなら、さらに遠い場所に保管するか、遮蔽物を多くする必要が有ります。これは、あくまでも一時的な仮置きなので、できるだけ早く行政機関が引き取ってくれるよう、交渉を継続してください。保管法の詳細は第4章にあります。

ver. 2012.5.9の主要改訂点

・＜重要＞巻末に付録を追加した（除染対象と判断する基準を再検討し新基準を提唱)。
・2.1節：測定機器の推奨基準をより詳細に記した。
・4章：ポリタンクに収納した除染土壌からの外部被曝量見積もりを改訂した（土壌の質量密度の見積もり値を訂正したため)。
・全体に渡って情緒的な表現を客観的なものに修正した。

1 緒言

本資料での線量率とは、ガンマ線のみによる線量当量率の事です。通常の線量計で測定困難なベータ線やアルファ線の線量率は考慮していない事に注意してください。汚染濃度も、現在の主要なガンマ線源であるセシウムの2つの同位体134と137の濃度のみを定量しています。他のガンマ核種やベータ核種、アルファ核種の濃度は計測していません。本資料での線量率や汚染濃度は、自治体や政府が公表しているものと同じであるので、直接比較する事ができます。

1.1 ミニホットスポットとは

福島第一原子力発電所の事故以来、関東甲信越地方以北の日本列島では、広く放射性物質による汚染が見られます。多雨である日本の気候条件により、ホットスポットと認識されている地域以外にも身近な所に多数の「ミニホットスポット」が形成されています。特にホットスポットと認定されている地域に隣接した地域には、ほぼ確実に形成されているはずです。これらミ

ニホットスポットでは相当高濃度の汚染が見られ、放置すると体内に取り込まれて内部被曝につながる危険が有ります。しかし、ミニホットスポット１カ所あたりの高濃度汚染土壌はわずかであり、我々市民の手で簡単に除染可能です。本資料では、「我々の身近に危険が存在する事」、「しかし、その危険は我々市民の手で低減可能である事」を伝えたいと思います。

福島第一原子力発電所の事故によって、大気中に大量の放射性物質が放出されてしまいました。燃料物質が溶融するという大変深刻な事故であったことが明らかになっています。燃料物質が溶融する程の高温環境では、セシウムやストロンチウム等の核反応生成物質は気化してしまいます。これら気体として放出された物質も、冷却されると凝結して微小なダストとなります。これらの放射性ダストはエアロゾルとなって、空気の流れとともに200km 以上も遠方まで拡散してしまいました。水素爆発事故後の降雨の際、これらダストが凝結核となり、雨滴中に放射性物質が取り込まれた状態で関東甲信越地方以北の地表に降下して、広範に汚染してしまったのです。この降雨による放射性物質の降下は一様ではなく、風向きや降雨のタイミングに依存して非常に不均一に分布しました。この時生じた高濃度汚染地域をホットスポットと呼びます。すなわち、ホットスポットとは、放射性物質が降雨によって最初に地表に降下した時に形成された１次的分布での高濃度部分の事です。一般にホットスポットは市町村程度の面積を持っています。

その後、日本は梅雨の季節に入りました。多雨である日本の気象の特性により、すでに地表に降下していた放射性物質の移動と再分布を生じました。本資料では、雨水の移動とともに形成された高濃度の部分をミニホットスポットと呼びます。すなわち、ミニホットスポットとは、雨水の移動によって放射性物質が移動、濃縮して形成された２次的分布での高濃度部分の事です。一般にミニホットスポットは非常に小さく、数十 cm 四方から数 m 四方の面積でしかありません。

これらミニホットスポットでは、場合によっては数万ー数十万 Bq/kg もの濃度に濃縮されています。しかし、1m も離れると空間線量率は周辺とあまり変わらなくなってしまいます。このため、注意深く調査しないと見落としてしまう可能性が高いのです。しかし、これをもって危険は無いと判断してはなりません。確かに外部被曝の脅威は小さいけれども、高濃度の放射性物質が身近な環境にむき出しになっていれば、体内に取り込むことでの内部被曝の危険が大きいのです。現在の政府の方針では、汚染濃度が 8,000 Bq/kg を超えると埋め立て処分ができず、管理が必要とされています。また、100,000 Bq/kg を超えると、放射線遮蔽をした上で厳重管理が求められています。このような特別な保管が必要になる程の高濃度の汚染土壌が我々の生活環境にむき出しで放置されている事が脅威なのです。ミニホットスポットの危険は、まさにこの内部被曝にあります。

ミニホットスポットは、雨樋の下、道路側溝、舗装斜面下部、滑り台下など我々の生活圏の至る所に無数に形成されていると考えるべきです。しかも、１カ所あたりの面積は非常に小さいのです。これらの特性から、航空機等を用いた遠隔地からの測定でミニホットスポットを正確に検出する事は不可能です。また、あまりに多数の小規模な高濃度汚染部分が生活圏に散在しているため、行政機関が発見し除染する事も現実的には不可能であると言っていいでしょう。したがって、市民が自主的にミニホットスポットを検出し、市民が自主的に除染し、当面は市民が汚染土壌を一時保管する事が必要になると思われます。

本資料は、まさにこのような「市民の、市民による、市民のための安全管理」を促すべく作成されました。ぜひ早期に除染を行い、内部被曝の危険を低減する活動を始めて欲しいと思います。我々の身の周りには確かに放置できない危機が有ります。しかし、その危機は、多くの場合、我々市民の手で対応可能です。呉々もパニックを起こす事の無いよう、留意して頂きた

いと思います。見方を変えれば、広く拡散してしまった放射性物質が雨の恵みによって局所的に濃縮されている今こそ、除染の好機であると言えるでしょう。今後の雨期や強い季節風の時期を経過すると、濃縮された放射性土壌粒子が雨水や風によって再拡散してしまうかもしれません。今のこの機を捉え、多くの市民により迅速に除染を進めれば、内部被曝の危険を相当低減できるものと思います。「正しく理解し、正しく怖れ、正しく対処する」ことを目指そうではありませんか。

以下では、ほとんどつくば市でのデータに基づいて議論しています。しかし、つくば市の現状に関する考察から普遍的な情報を引き出す事が出来ます。汚染マップを見た時に、つくば市同様ホットスポットに隣接している地域では同様に放射性物質の濃縮が起こり、ミニホットスポットが形成されているはずです。本資料は、つくば市以外の地域での放射能汚染に対処する際にも役立つ事と確信しています。

1.2 内部被曝の危険

ホットスポット周辺地域に生じるミニホットスポットの場合、つくば市内での我々の経験からすると、地面直近の地上高 5cm での線量率は 1-3μSv/h の程度でした。この程度の線量率であれば、ミニホットスポット直近に長時間居続けない限り、外部被曝に関してはそれほどの危険は無いように思われます。恐ろしいのは内部被曝です。大学での物理学実験等で放射線を扱う場合、実験室内には放射線が飛び交っています。しかし、その線量は微弱であり、問題にされる事はありません。さらに放射線を出す放射性物質はカプセル様の容器に収納されていています（密封線源と呼ばれている）。したがって、このカプセルごと飲み込みでもしない限り、内部被曝する危険はないのです。一方、今回の原子力発電所事故以降、我々の生活環境には、放射性ダストの形で「非密封の線源」が至る所に散在しています。事故原発至近の地域やホットスポットと認定されている地域を除けば、実験室同様に放射線量は多くの場合高くないでしょう。しかし、実験室と違い、簡単に体内に取り込みかねない状態で放射性物質が生活圏にまき散らされているのです。これは我が国に於いて我々がこれまで経験して来なかった事態です。

以上のように、現在、高濃度の放射性物質が我々の生活環境にむき出しで放置されています。このままでは、知らずにミニホットスポットの汚染土壌が体（特に手）に付着し、経口で体内に取り込んだり、乾燥と強風で舞い上がった汚染土壌を呼吸によって肺に取り込んだりして内部被曝してしまうでしょう。

現在の主要なガンマ線源であるセシウムの 2 種の同位体 134 と 137 は、ガンマ線も放っていますが、同時により危険なベータ線も放っている事に注意しなくてはなりません。また、最近遠隔地でも検出が報告され始めたストロンチウムの 2 種の同位体 (89 と 90) はガンマ線は放たずベータ線のみを放ちます。ガンマ線は透過力が強いため、遠方に放射線源が有る場合でもガンマ線外部被曝してしまいます。一方で、ガンマ線源を体内に取り込んでしまった場合、線源の放つガンマ線は人体をほぼ素通りして外部に出てしまいます。だから安全であるとは言えないのですが、ガンマ線は主に外部被曝上の危険となっていると言って良いでしょう。

一方、ベータ線は透過力が弱いのです。セシウム同位体の放つ程度のエネルギーのベータ線は、空気中では平均で数十 cm 程度しか飛びません（最大でも 1m 程度。ストロンチウム 90 の崩壊過程では、より高エネルギーで数 m 飛ぶベータ線も放たれる）。靴底によってさえ遮蔽されます。したがって、線源からある程度離れてしまえば、ベータ線によって外部被曝する危険はほとんどありません。この事は、逆にベータ線のみを放つ核種による汚染を線量計で発見することは困難である事につながっています。このベータ線源を体内に取り込んでしまった時に

は危険が大きいのです。透過力の弱いベータ線は、体内では数 mm 飛ぶと吸収されてしまい、周囲の人体組織がエネルギーを全て受け止めて確実に内部被曝してしまうからです。

ガンマ線に対応した線量計でミニホットスポットを検出したなら、そこからはベータ線も放たれていると考えるべきです。そのような汚染土壌粒子を体内に取り込んでしまうと、確実に内部被曝を引き起こします。この内部被曝の危険を最小に抑える努力を呼びかけるのが、本資料の目的です。

2　ミニホットスポットの検出方法

我々が検出したミニホットスポットには、ある共通した地形上の特徴がありました。『周辺の広範囲からの雨水を集めた所に少量の土壌が堆積している箇所』です。これは、原発から放出後に拡散した放射性物質が、雨（特に梅雨や台風などの大量降雨）によって地形的に雨水の集中し易い場所に集積して濃縮された事を意味しています。ここでは、目には見えないミニホットスポットをどのようにして効果的に、かつ簡単に検出するかについて述べます。必要な機材は正確な線量計と物差しだけです。

2.1　測定機器

正しい測定のためには、十分な精度が保証された線量計がぜひとも必要です。選択肢は多数有る事と思うので、正しい選択眼が必要になります。現在、我々の環境での主な放射線源であるセシウムの２つの同位体から放たれるガンマ線（光子エネルギー 600-800 keV 程度のもの）を検出できる線量計である事が前提です。短期間にミニホットスポットを効率よく検出するには、精度だけでなく感度が高い事も重要です。市販されている線量計には、GM 管式とシンチレータ式がありますが、一般にシンチレータ式の方が高感度なので推奨できます。低感度の線量計を用いると、1 カ所での測定に長い時間が必要となってしまい、多数点での測定をする事が事実上不可能になってしまいます。精度が低く、表示値があまりに激しく変動する場合にも、測定値の決定が不安になります。実用に足る性能／機能の目安として

・感度 $\geq$ 1000 cpm/(μSv/h) 程度（「線量率 0.01μSv/h に対して毎分 10 カウント以上」に相当）
・精度 $\leq \pm$ 10 %程度（相対精度：計測開始後の表示値の変動の割合）
・カウント毎にビープ音を出す機能付き（線量率の変化を素早く検知するために有効：次節参照）

の機材を推奨します。これらの情報は、機材の仕様表をみれば確認できます。これを大幅に下回る低感度／低精度の機材は実用的ではありません。もちろん、出荷時に十分に校正されている事が前提です。事前に出来るだけ他の線量計と比較して、あまりに表示値が他の機材と異なる場合には、校正が不十分である事を疑うべきでしょう。自治体が線量率を公表している場所で測定し、機材の校正を確認する方法も有ります。

我々が用いたハンディタイプ CsI シンチレータ（ホリバ製 PA-1000 Radi）は、上記の条件を満たしており、十分実用的でした。また、製造元での校正が十分行われており、別の校正済み測定機器（NaI シンチレータ：EMF ジャパン製　EMF211）と比して、線量率の表示値が３桁まで一致することも確認しました（現在は、より高線量率な状況とコンピュータでのデータ管理に対応した新機種 PA-1100 も発売されています。つまり、市民が、PA-1000 では測定できない 10μSv/h 超もの高線量率を測定する需要があると言う、我が国の非常に厳しい現実を反映しているのでしょう）。現在、非常に多くの線量計が販売されているので、この機種に限らずとも実用的な機種も多々有ろうと思います。ただし、あまりに安価な機材には、感度と精度の両面で問題を持つ製品も有るようなので、注意が必要です。実用に耐える線量計は高価な機材であるので、感度と精度を慎重に確認した上で導入する事が望ましいと思います（現在１２万円前後のようです。今後安価になる事を期待します）。今後、何十年も利用する可能性があるので、安全管理に絶対必要な機材である事を考えれば高い投資ではないでしょう。最近では多く

の自治体で線量計の貸し出しを行っているので、これを利用するか、地区自治会単位で購入して、会員で共有使用するのも良いでしょう。

2.2 測定法

我々が、ハンディタイプの線量計を用いて効率的にミニホットスポットを検出した簡便な方法を紹介します。専門知識無しに簡単に検出可能であるので、市民の協力と連帯によって短期間に生活圏のミニホットスポットを検出する事が可能であろうと思います。必要なものは、ハンディタイプ線量計、測定部を地上高 5cm にするための「物差し」（著者等は使い捨てプラスチックカップを輪切りにして作成した）、測定部を地上高 1m にするための「物差し」（著者等は登山用伸縮式ポールの長さを調節して使用した）です。下記では、公園、学校のような施設、住宅街の１ブロックなどでの測定を想定しています。この測定法については、別資料「図解！ミニホットスポット検出法」と合わせて見て頂くと、より容易に理解できるでしょう。

i) 施設の敷地中央付近で地上高 1m 空間線量率（A とする）を測定し、その地区の空間線量率の代表値とします。線量計の取扱説明書に従って正しく測定する事が大切です。

ii) 線量計を、ガンマ線を検出するたびにビープ音の出る設定にしておきます。線量計をストラップなどで地面に近づけた状態（地上高 10cm 程度以下）で測定したい施設の各所（特に周辺部）をゆっくり歩きます。ビープ音の時間間隔の変化から移動に伴う線量率の変化が判断できます（図 1 参照）。

iii) ビープ音の間隔が狭まって来たら、高線量率の区域に入った事が分かります。目視により付近の雨水が集まり易そうな場所を見いだし、その地点での「地上高 5cm での空間線量率（B とする）と 1m での空間線量率（C とする）」を測定します（図 2 参照）。もし、B が高線量率と見なす基準値（例えば 1 μSv/h）を超え、C は A と同程度（$C < 2A$ 程度）なら、その場所がミニホットスポットであると考えられます（数十 cm 四方程度が局所的に高濃度）。一方、B が基準値を超え、C も A よりかなり高い（$C \geq 2A$）なら、その周囲数 m 四方程度が局所的に高濃度と考えられます（図 2 参照）。この場合、周囲の 5cm 線量率を広く多点で測定して、ミニホットスポットの広がりを確認します。下の表 1 を参照してください。

表 1 ミニホットスポット検出法

5cm 線量率 B (μSv/h)	1m 線量率 C と周辺線量率 A の比較	判定
$B \geq 1$	$C < 2A$	狭いミニホットスポット（数十 cm 四方程度以下）
$B \geq 1$	$C \geq 2A$	広いミニホットスポット（数 m 四方の可能性有り）
$B < 1$	—	汚染濃度は低い（要経過観察、例外有り）

注）今回の改訂では、巻末付録に於いて除染対象とするミニホットスポットの B による判断基準を見直す検討をしています。こちらもご覧下さい。

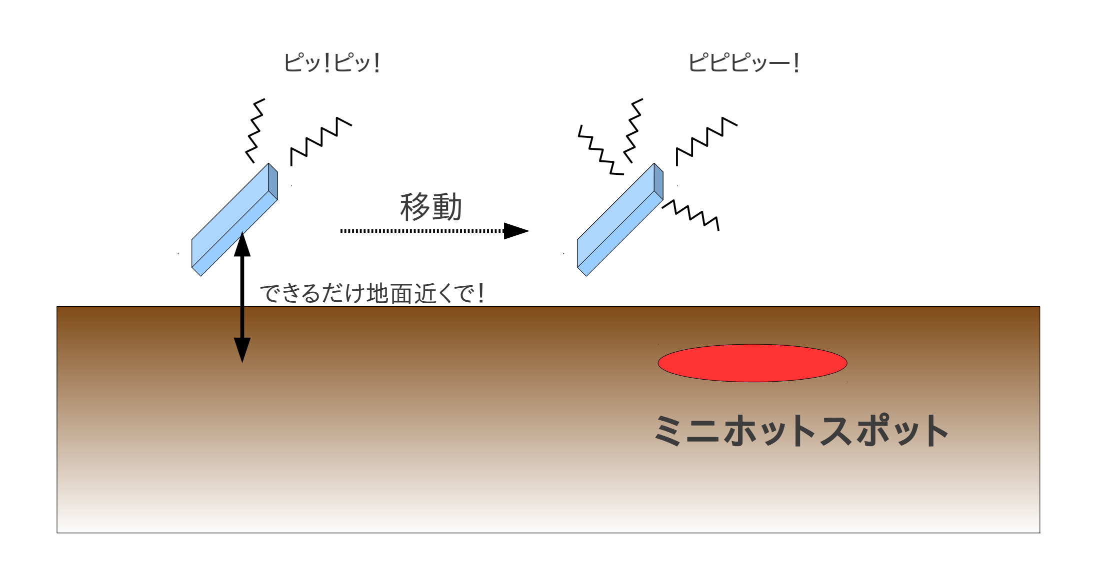


図 1: 歩きながらの検出法

ここで注意しておきたい事が有ります。自治体が学校や公園等の線量率を公表している場合、ほとんどは「敷地中央部での 1m 線量率 A」です。しかし、著者等の経験から、この値は施設での最小値になっている事が多いようです（土木の常識として、排水を考えて敷地の中央をやや高く造成する事が多いためと思われる）。敷地の隅にはより高線量の領域が散在している事も多いので、敷地中央値だけで安心する事無く、限無く調べる必要が有ります。また地上高 1m での線量値測定だけでは数十 cm 四方の小さなミニホットスポットは検出できません。怪しいと感じた場所では、必ず 5cm での測定を行うべきです。

ここまでの i)-iii) はハンディタイプの線量計と物差しのみで実行可能で、専門知識を要しません（市民による人海戦術が可能）。以下は、汚染濃度確認が必要な場合に行うオプションです。iv) に関しては、行政機関が依頼した専門機関での測定を要します。v) に関しては、各方面学者と行政担当者を交えて設定する基準に従うべきです。

iv)　ミニホットスポットと思われる場所で土壌サンプルを採取し、核種解析（どの放射性核種がそれぞれどれだけの濃度で含まれるか）をして汚染濃度を確認します（サンプル採取法の詳細は別資料とする）。

v)　汚染濃度が、例えば「10,000 Bq/kg を超えると危険」などとと判断します。

諸注意を述べます。線量率を測定する地上高「5cm」は変更可能です。地面至近の値であれ

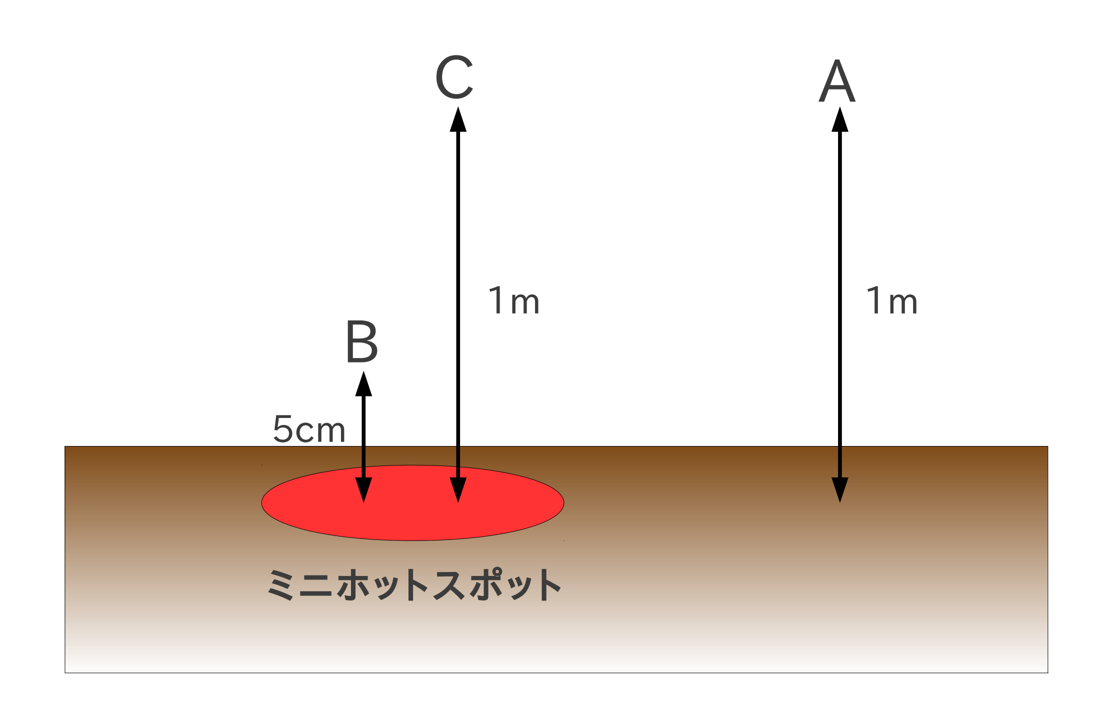


図 2: ミニホットスポットの簡易検出法図解

ばいいのです。ハンディタイプの線量計にも筐体の厚みが有り、例えば地上高 1cm の線量率だと測定できない機材も存在するでしょう。いろいろな機材を織り交ぜて測定する場合でも、測定値の比較を可能にするためには、どの機材でも測定可能な方法を採らなくてはなりません。地上高 5cm での線量率ならば、どのハンディタイプ線量計でも測定可能であろうと見込んで、5cm という値を推奨しています。B の基準値は、我々の経験から導き出しています。高濃度汚染の面積や深さによって、同じ濃度であっても B の値は異なるはずです。しかし、B の値が 1(μSv/h) を超える場所の汚染濃度を測定すると、全て数万 Bq/kg 以上の値となりました（表 2 参照)。1.0 に拘る必然性は無く、0.8 でも 1.2 でも良いかもしれませんが、ここでも他者の測定結果と比較する事を考えて、一つの分かりやすい基準として 1(μSv/h) としました（注：この基準値はやや高すぎたようです。汚染濃度と 5cm 線量率の関係については、本資料巻末の付録も参照してください)。この基準値をあまり下げすぎると除染すべき土壌が大量になってしまい、保管と管理に窮する事にも注意しなくてはなりません。同様に、C と比較するのは 2.0A でなくても 1.8A や 2.2A でも問題は無いでしょう。分かりやすい基準として 2A を推奨しています。

下記表 2 では、上記方法によるミニホットスポット検出の実例を紹介します。表 1 と比較しながら数値を確認してください。事故原発から 160km 程も離れており、ホットスポットとも認識されていないつくば地域でもここまで高濃度の汚染が存在しているのです。下記例での汚染土壌は全て濃度 8,000Bq/kg を超えているので、埋め立て処分できません。特に、最初の例は 100,000Bq/kg をも超えているので、管理のためには放射線遮蔽を要します。このような汚染土壌が我々の生活圏にむき出しで放置されているのです。

表2　ミニホットスポットの実例

場所	汚染濃度 (Bq/kg)	B/C (μSv/h)	A (μSv/h)	判定
教育施設側溝	271,000	1.06/0.23	0.17	狭い (3cm×20cm 程度)
教育施設スロープ下	52,000	1.06/0.46	0.17	広い (1m×2m 程度)
住宅街側溝	37,900	2.59/0.29	0.20	厚く堆積 (20cm 程度)

汚染濃度は、国立天文台設置の Ge 半導体検出器（EURISYS MESURES 製 EGPC15-190-RN53100）を用いた核種解析の結果です。土壌サンプルは、地面表層の 2-3cm 程度をスコップではぎ取って採取し、計測時には、全てのサンプルを同じ理科実験用規格プラスチック容器に計量して測定しています。現在の主要なガンマ線源である Cs137 の 661.7 keV 輝線と Cs134 の 604.7 keV および 795.9 keV 輝線からそれぞれの同位体濃度を求めました。表 2 には、これら 2 核種の濃度の和を示しています。27 万 Bq/kg 超もの高濃度汚染土壌が若年層の集う教育施設内にむき出しで放置されていた事に注目すべきです。しかし、ここでの汚染土壌の総量はハンドスコップ二掬い分程度と極少でした。

注意を要する例外を挙げます。我々は、住宅街の公園にも高濃度汚染を検出しました。$B = 0.63$ (μSv/h) であったにも関わらず、汚染濃度は 14,100 (Bq/kg) と埋め立て処分不可能な値でした。これは、幅約 7m の広い滑り台の下です。汚染土壌はむき出しになっています。滑り台を滑り降りると必ずここに達します。多くの子供たちはここで尻餅をついたり、地面に手をついて立ち上がったりします。その手で食べ物を口に運ぶと、内部被曝に直結するのです。そのような場所がこの濃度にまで汚染されている事を重視してください。この場所は、幅数センチで細長い汚染領域になっているため、1m 線量率 C は高くないので検出がやや困難です。$B < 1$ (μSv/h) であったとしても、幅が非常に狭い場合にはこの程度の濃度に達している場合も有る事に注意が必要です。線量計をより地表に近づけて線量を測ることである程度危険を察知できるでしょう。「ここは怪しい」と思ったら注意深く測定する事が大切です。本資料巻末の付録も参照してください。

上記の方法は、ミニホットスポットを簡易に検出するのに大変有効ですが、完全ではありません。注意深い目視との併用で見落としを減らす努力も必要です。それでも、顕著なミニホットスポットを簡便に効率よく検出できるので、ぜひ試してもらいたいと思います。

日本の気候は非常に多雨である特徴を持っています。大量降雨の雨期を経過すると、一度発見し除染したはずの場所に、何度もミニホットスポットが形成されてしまう事が十分に考えられます。一度の除染で安心せず、雨期を経過するごとに上記方法でのミニホットスポット調査を繰り返す必要が有ります。そしてミニホットスポットが形成されている事が判明すれば、こまめに除染し続ける事で、半減期を待たずに放射性物質を地域から効率的に除去する事が出来るでしょう。

2.3　測定法の根拠

上記検出方法は、大学教養課程程度の初等的な電磁気学の結論の応用です。距離による強度変化について、放射性物質から放射される放射線は、電荷の作る電場と同じ性質を持っています。点電荷の作る電場と面電荷分布の作る電場の距離依存性の違いを思い出してください。放射性物質が点と見なせる場合には、これから放射される線量は距離の自乗に反比例して減衰し

ます。しかし、放射性物質が広い面積に一様に分布している場合には、線量は距離にほとんど依存しなくなります（実際には空気による減衰が有るので、遠ざかると多少減衰する）。電灯の灯りに例える事もできます。1 個の電球によって照らされた明るさは距離の自乗に反比例して減衰します。広い部屋の天井中央に電球 1 個だと、直下は明るくても、部屋の隅では光は弱まり暗くなります。しかし、天井一面に無数の電球を配置すれば、部屋のどこでも明るいのです。この場合には、明るさは電球を取り付けてある天井の高さに依存しません（無限に広い天井で、空気による吸収／散乱が無い場合）。

地上高 5cm 線量率 B が十分大きい場合には、その直下に相当量の放射性物質が有る事を示しています。著者の経験から、$B \geq 1$ (μSv/h) の場合には例外無く埋め立て不可能な汚染濃度になっていました。ただし、例外的に、$B < 1$ (μSv/h) でも埋め立て不可能な汚染濃度の場合もあるので、B だけでの判断は完全なものではないことに注意してください。この場合には、さらに線量計を地面に近づけて線量率の上昇を見ないと高濃度である事が確認できません。この点に関して、本資料巻末の付録も参照してください。

まず、高濃度汚染領域が 10cm 四方程度の広がりでしかない場合を考えましょう。地上高 1m から汚染領域を見下ろせば、汚染領域は非常に小さく見えます（汚染領域を見込む立体角が小さくなる)。この場合には、線量率は地上高の自乗に反比例して減衰します。したがって、5cm 線量率 B と比して 1m 線量率 C はかなり小さくなるのです。もし C が周辺代表値 A と同程度になっていれば、その汚染領域からの影響はほぼ無くなったと見なせる位に遠ざかった事を意味します。すなわち、A、B、C の比較から、汚染領域は 1m と比して非常に小さい領域であったことがわかるのです。

次に高濃度汚染領域が数 m 四方程度の広がりであった場合を考えます。この場合、地上高 1m から見下ろしても汚染領域は小さく見えません。したがって、先の場合程 C は小さくなりません。周辺代表値 A と C を比較して顕著に大きいなら、その汚染領域は 1m よりもずっと大きなサイズである事がわかります。この場合には、測定点周囲の 5cm 線量率を広く調べて回り、ミニホットスポットの広がりを確認しなくてはなりません。

このように、電磁気学の基礎を応用する事で、地上高 5cm 線量率 B、1m 線量率 C、周辺代表値 A の比較によって、汚染濃度とサイズについてかなり豊富な情報を得る事ができます。これらの情報を元にして効果的な除染を行う事ができるでしょう。

3　ミニホットスポットの除染方法

実践的除染方法についてはすでに多くの情報が出回っているのでそれらを参照してください。除染に際しての実践的注意事項については、例えば南相馬市放射性物質除染マニュアル（http://www.city.minamisoma.lg.jp/mpsdata/web/5038/josen-manyuaru.pdf）が有用でした。

除染作業中と作業直後に放射性物質を含んだ汚染土壌の粒子を体内に取り込んでしまわないよう、注意が必要です（特に経口と呼吸による吸入）。除染作業途中での飲食は論外です。除染作業直後にシャワー等で体についた粉塵を洗い流し、作業時に着用した衣服もすぐに洗濯するか、場合によっては廃棄すべきです。特に除染後の飲食前の手の入念な洗浄は重要です。除染に使用した機材も入念に土壌汚れを洗い流さなくてはなりません。除染作業での汚れをできるだけ室内に持ち込まない工夫も要します。

落ち葉や枯れ枝にも放射性物質が吸着されている事が多いので、これらも砕いて土壌に混ぜ込んで除去します。除去の前後で必ず効果確認をします。効果不十分であれば、再度線量率測定をし、追加除去を行います。できるだけ効果確認や作業報告をまとめて Web 等で公開しましょう。こうして市民が情報共有する事で、より有効な除染方法を市民の連携の中から発見し普及できる可能性があります。今回の未曾有の事態に対して、十分な実践経験を持つ専門家は極めて少数です。多数の市民の試行錯誤の中から、本当に役立つ実践的専門知識が生まれて来るものと期待します。

我々はどの程度の除染を目指すべきでしょうか？これについては、誰も明確な答えを与える事は出来ないでしょう。微弱な放射線量での人体への影響については、未だ定説と言えるものが無い状況です。しかし、今回の原発事故前の国際標準の安全基準（国際放射線防護委員会 [ICRP] の勧告基準）である「追加年間被曝量 1mSv 以下」を目指す事には、一定の法的根拠が有ると言えるでしょう。我が国では、「電離放射線障害防止規則」によってこの値が定められています。追加被曝とは、自然放射線や医療放射線以外の人為的放射線による被曝の事です。例えば、つくば地域の自然放射線量率は 0.06μSv/h 程度です。1mSv/yr を換算すると 0.11μSv/h 程度です。したがって、つくば地域であれば、「線量率 0.17μSv/h 以下」が追加年間被曝量 1mSv 以下に相当します。下記では、適切な除染によって、この目標は達成可能である事を述べます。以下では、他の情報源ではあまり触れられていない、除染すべき深さ、汚染土壌の収納容器と作業時に使うマスクについて主にコメントします。

3.1　除染すべき深さ

著者の一がつくば地域の自宅庭土で放射能汚染の深さの降雨による変化を測定しました（表３参照）。梅雨の大量の雨水によってアルカリ金属であるセシウム同位体などの放射性物質が溶かされて地面の深くに浸透したか、土壌中の粘土成分に吸着されたセシウム同位体が微小な土壌粒子ごと土中に潜り込んだ事による変化と推定しています。それでも、梅雨明けの時点では、ほとんどの放射性物質は地表からの深さ 3cm までに留まっていました。その後、台風の降雨でもう少し深くまで拡散したと思われますが、梅雨と同程度の降雨量であったとしても、まだ 5cm 以内の深さに留まっていると思われます。この事からも、小面積で浅いミニホットスポットを除染するのにバックホー（ユンボ）やブルドーザのような重機は不要である事がわかるでしょう。除染すべき深さは、土壌の性質や雨水の流れに大きく左右されるので、つくばの土質（サンプル採取した著者の一の居住地周辺一帯は「黒ボク土」）で平坦な地面の場合の参考値と

考えてください。セシウムを吸着し易い粘土質土壌であればより浅い部分に留まっている事が期待できますし、水を透し易い砂礫質土壌の場合にはより深い所にまで浸透しているかもしれません。雨水が溜まり易い地形の場合には相当深くまで浸透している可能性があります。除染すべき深さを事前に正確に見積もる事は、実際には非常に困難で、除染作業をしながら線量計を用いて入念に効果測定をしないと判断できない事に注意してください。

表3　汚染深さの変化

日付	汚染濃度 (Bq/kg)	空間線量率 [5cm/1m](μSv/h)	汚染深さ (cm)
4/17（梅雨前）	8,604	—/—	1.6
7/14（梅雨後）	5,356	0.230/0.227	2.6
7/29（撹拌後）	352	0.195/0.170	40

注意を述べます。表3の空間線量率は、ほぼ長方形の庭の四隅と中央で線量率を測定した平均値を示しています。汚染濃度は庭中央の1点から採取した土壌サンプルの核種解析の結果です。7/14 の空間線量率が、地上高 5cm と 1m でほぼ同じである事から、ほぼ一様に放射性物質が分布していると考えられるので、庭中央1点の濃度測定で十分と判断しました。4/17 の時点では線量計を入手できていなかったため、空間線量率は測定していません。梅雨明け後に除草と耕耘機による深さ 40cm までの庭土撹拌を行いました。これはヒマワリによるセシウム吸着実験のための準備でした（土中カリウムの多い日本の土壌では効果が無かった事がすでに判明しているので、その後中止した）。撹拌なので除染にはなっていません。しかし、地表付近の放射性物質濃度を下げる効果があったため、空間線量率が顕著に低下しています。特に 1m 線量率は、目標とした「追加年間被曝量 1mSv 以下」を達成できています。深さ 40cm までほぼ均一に撹拌されたと仮定して、このときの汚染濃度から、逆に撹拌前の 4/17 と 7/14 について、汚染深さを見積もった値が上記表に示されています。ここでは、表記の深さまで一様に汚染されており、それより深い場所での汚染は無いという単純な仮定をしています。しかし、大まかな汚染深さの目安にはなっているでしょう。降雨の影響で汚染物質が深い所にまで浸透して行く傾向が見られます。

表面付近の汚染土壌を除去した場合にも、当然表面付近の汚染濃度を下げる事ができます。その場合にも同様に空間線量率が顕著に低下する事が期待できます。『つくば程度の汚染状況であれば』、追加年間被曝量 1mSv 以下を達成する事は十分可能であると思われます（より汚染の厳しい地域 [ホットスポット内] については対処法を変える必要があるかもしれません。第4章冒頭部を参照してください）。

降雨は、一度拡散してしまった放射性物質を水の集まり易い場所に濃縮する効果をもたらします。一方でこのように地面の深い所にまで拡散させてしまう効果も合わせもっているのです。今後も雨期を経過するたびにより深くまで汚染されるかもしれません。深くまで汚染されてしまうと、それだけ除去すべき土壌が増えてしまうし、地下水汚染等を来す恐れもあります。浅い所に集中しているうちに除染する事が望ましいと思います。

除染すべき深さは、今の所それほど深くはないだろう事が分かりました。過剰な除染は、除去土壌を不必要に増やすだけであり、放射性物質除去上の効果はありません。さらに、雨でせっかく濃縮された放射性物質を汚染されていない健全な土壌と混ぜて濃度を下げてしまうことになります。また大量の除染土壌の保管にも苦労するでしょう。安心のためについ深くまで除染したくなるでしょうが、効果が無いばかりか悪影響が大きいので、厳に慎むべきです。

除染に際しては、線量計による効果測定を並行することが大切です。除染前の5cm線量率を測っておきます。まず表面土壌を深さ3cm程度除去して、再度5cm線量率を測定します。顕著な減少が見られればそれで止めます。十分な効果が見られない時には、さらに数cm除去して5cm線量率を測定します。この繰り返しで、必要最小限の面積と深さの除染に留めるべきです。

3.2 ポリタンク

現在、汚染土壌除染に際して、除去した土壌を収納するために土嚢袋が用いられる場合が多いようです。土嚢袋は安価ですが、危険物の収納容器としては心許ありません。再流出と内部被曝の危険を低減するには、土嚢袋ではなく、ポリタンクのような丈夫で遮水性を持つ容器が望ましいと考えます。埃を舞い立たせず、水に濡れても内部の放射性核種が漏れ出す事の無いようにするためです。現在、大量に発生する汚染土壌の保管用地の確保にどの自治体も窮しており、当面は市民が保管する必要があるでしょう。除染地近辺でしばらく保管した後、最終的に行政管理の処分場に移す事を考えると、ある程度の期間に渡って内部の放射性物質を漏らさない密封性が必要です。また、移動させる際にも土壌が漏れ出さず、容易に運べるようにする事を考えると、土嚢袋よりもポリタンクの方がはるかに優れています。地域住民の手で除染できる程度の汚染状況の場合には、我々の経験上、除去すべき土壌総量は、学校や公園または住宅街の１ブロック当たり20Lタンク数個分程度と見積もられます。土嚢袋と比してポリタンクの単価は高いですが、この程度の量であれば、コストが深刻な問題になる事はないでしょう。ポリタンクを用いて内部被曝の危険をより低減させた方が安心と思います。通常の石油ポリタンクでは、キャップ部の径が10cm程度のため、スコップで土壌を入れるためには狭すぎるでしょう。インターネット通販等で広口のポリタンクを見つける事ができるので、石油タンク、水タンク、アウトドア用コンテナなどから探してみて欲しいと思います。形状にも注意が必要で、できるだけ直方体に近いものが望ましいのです。例えば円筒形状では、密着させての保管ができません。除去した土壌自身による放射線遮蔽効果も期待できるので、容器同士をなるべく隙間無く密着させて保管する事がよいのです。そのためには、密着保管し易い直方体形状のタンクが最善です。

3.3 防塵マスク

チェルノブイリ事故や過去の核実験の情報から、0.3μm程度のサイズの微粒子を除去できる性能を持ったマスクでないと、呼吸による吸入での内部被曝を避ける事はできません。スーパーマーケットやドラッグストアで簡単に入手できるサージカル（外科用）マスク（インフルエンザや花粉症対策に広く用いられている薄手のもの）では全く不十分です。これらのマスクを風邪予防に用いる際にも、飛沫を防ぐ事はできてもウイルスそのものは防げない程度の能力しか持っていないのです（飛沫はウイルスより遥かに大きい）。著者は、工業用防塵マスクの使用を推奨します。N95、N99、N100などいくつかの規格がありますが、現在入手できる最高性能の防塵マスクは「N100規格」を満たすものです。「N100」とは、0.1-0.3μmの微粒子をほとんど（99.97%以上）除去できる性能を持っていることを保証するアメリカの規格です。防塵マスクの性能と、それを要する理由については、下記URLの情報が有用です。
http://matome.naver.jp/odai/2130302075582378001
ただし、N100マスクは、使い捨てであるにもかかわらず１個２千円程度もします（世界中で数社しか製造技術を持っていないらしい）。しかし、４０時間程度の使用が可能なので、ミニホッ

トスポットの除染作業ならば１０回程度も使用できるでしょう（本来使い捨てであり、繰り返し使用は推奨されていないので自己責任となる）。除染作業による内部被曝を最小限に抑えるためには、この程度の出費を惜しんではならないと思います。N100 マスクは、インターネット通販等で入手可能ですので、地区自治会等でまとめ買いして、除染作業者に使用させる事を推奨します。

4　汚染土壌の保管方法

除去した汚染土壌は、直ちに行政管理の処分場に引き取ってもらいたい所です。しかし、報道によると、どの自治体でも大量の放射性汚染廃棄物の処分場確保が難航しているようです。当面は（数年間？）、除染したその地域での管理が必要になるでしょう。管理処分の困難さから除染を先送りする事は危険です。高濃度汚染土壌を放置すれば、体に付着して経口で取り込んだり、風で舞い上がった放射性物質を呼吸で吸入したりして内部被曝につながるからです。まずは速やかに密封容器に閉じ込めて内部被曝しないようにする事が大切です。

我々がホットスポット周辺地域について調べた所、除去すべき高濃度汚染土壌の総量は、学校／公園等の施設や住宅街１ブロックあたりで高々100L の程度のようです（もっと少ない場合がほとんどと思う）。この程度の体積ならば、その場での保管はそれほど困難ではないでしょう。ただし、大量の汚染土壌除去が必要な「ホットスポット」と呼ばれる地域では、住民だけでの除染と汚染土壌管理は不可能と思われるので、対応法を変える必要が有ります。この場合には、行政機関主導の除染に市民も協力する形を取らざるを得ないでしょう。ここでは、ホットスポット周辺地域でのミニホットスポットの市民による自主的除染のみを考える事にします。

問題になるのは、除去した汚染土壌から放たれる放射線による外部被曝です。すなわち放射線の効果的遮蔽が必要となります。密封性の容器に汚染土壌を収納すれば、最早除去した土壌による内部被曝の危険は皆無と言っていいでしょう。残る危険は外部被曝のみなのです。以下では、外部被曝の危険を低減させるための線量率低減法について検討します。

ここでは、20L ポリタンク数個程度の総量の汚染土壌を市民の生活圏にて一時保管する事を念頭に置きます。それ以上に大量の汚染土壌が発生する場合には、住民だけでの除染や保管は危険であり、行政機関の主導が必要であることを強調しておきます。

少量の汚染土壌からの外部被曝を低減するには、「生活空間までの距離を置く」ことと「遮蔽物で囲う」ことが有効です。

・距離を置く

小体積の線源からの線量は、距離の自乗に反比例して減衰します。主な生活場所から離れた、普段人が近づかない場所に保管するのが良いでしょう。施設裏庭、倉庫、地下室などが想起されます。住宅街であれば、庭のなるべく住居から離れた部分が良いでしょう。

・遮蔽物で囲う

現在の主要なガンマ線源であるセシウム同位体から放たれる程度のエネルギーのガンマ線であれば、水によっても効果的な遮蔽が可能です。20L の石油用ポリタンクの厚みにあたる 20cm の水の層はガンマ線を約 54%遮蔽できます。ポリタンクを２重にして 40cm の厚みにすると約 79%、３重にすると約 90%遮蔽できます。除去した土壌をポリタンクに収納し、周囲を水で満たしたポリタンクで囲む事で、相当のガンマ線の遮蔽が期待できます。土は水よりも高い遮蔽効果を持ちます。もし、汚染されていない土壌が豊富に使える場合には、土を満たしたポリタンクや土嚢で囲む事はさらに有効です。ただし、遮蔽に用いる土は放射性物質に汚染されていないものでなければ遮蔽にはならない事に注意してください。

水による遮蔽の実践例として、福島県郡山市立橘小学校の取り組みを紹介したいと思います。PTA 共同で教室の外周に水入りペットボトルを並べてガンマ線遮蔽を企図した所、教室内の線量率を半減させる事に成功したと言うものです

（http://www2.schoolweb.ne.jp/weblog/data/0710015/e/a/667258.pdf）。市民による積極的かつ迅速な努力が被曝を低減させると言う好例であると思います。

では、距離と遮蔽物の効果を定量的に検討しましょう。厳しい状況で安全性を評価するために我々が経験した中では相当高めの値である土壌汚染濃度 10 万 Bq/kg の汚染土壌を 20L ポリタンク数個に収納保管する場合を考えます。土壌の質量密度は、湿潤状態に相当した典型値として 1.5kg/L を仮定します（我々の生活環境での土壌の湿潤密度は 1.2-2.0kg/L と見積もられます。資料 http://www.city.hachinohe.aomori.jp/index.cfm/9,41978,c,html/41978/20110707-102848.pdf の表 2-8-3 参照）。この場合、汚染土壌は 20L ポリタンク 1 個あたり 3.0×10^6 Bq の放射能を持ちます。ポリタンク５個（100L）では 15×10^6 Bq です。

汚染土壌を我々の生活圏に保管すれば、空間線量率はわずかながら上昇し外部被曝量がわずかに増加する事は避けられません。しかし、内部被曝の危険が激減するのであれば、その方が総合的危険の低減のためには有効でしょう。ここでは、消費税に倣って、日常生活空間での空間線量率増加を 5%以内に抑えられるのであれば、その程度の外部被曝増加は甘受しようという立場で評価します。そもそも我々の用いた線量計の精度（相対指示誤差）は $\pm$10%ですので、5%以内の増加であれば、線量率の増加を有意に検出する事は出来ません（線量率が増加したとは気づかない）。これで十分と考える事にします。

著者の一の自宅のある住宅街ブロックでの地上高 1m 空間線量率は約 0.2μSv/h です（2011 年７月の時点。これはチェルノブイリ事故時のベラルーシ共和国での第２区分「補償付き任意移住エリア」に相当する！）。ホットスポット周辺の地域ではこの程度の線量率になっている箇所は多いと思います。線量率の 5%にあたる 0.01μSv/h の増加以下に抑える事を目指します。20L ポリタンク１個を遮蔽無しに庭に保管（放置）する場合、距離 5m 離れた住居部建物外での線量率増加は 0.0092μSv/h に過ぎず、すでに目標を達成しています（屋内ではさらに小さくなる）。5m の距離を取るだけで大丈夫なのです。ポリタンク５個を遮蔽無しで庭に置いた場合には、5m 離れた場所での線量率の増加は 0.046μSv/h となり、1/4.6 まで減衰させないと目標は達成できません。この場合には、距離 10.7m に遠ざけるか、厚さ 20cm の水の層で囲めば目標が達成できます。実際には、汚染濃度がここで仮定した 10 万 Bq/kg にもなる事は多くないでしょう。また、掘り起こしてポリタンクに収容した土壌は、元よりも隙間が多くなりますので、質量密度はここで仮定した 1.5kg/L よりも小さくなるでしょう（ここで言う質量密度とは、土壌粒子の質量密度ではなく、土壌の質量を空隙込みの包絡体積で割った値の事である。専門用語としては湿潤密度または乾燥密度に相当する）。すると、ポリタンク 20L 中の放射能も小さくなり、より安全に保管し易くなります。現実的には、住居部からできるだけ離れた土中に埋設することで、十分に目標達成可能でしょう。汚染土壌を埋設した目印として、水入りポリタンクで埋め立て地面を蓋しておけばより安心です。鉄筋コンクリート造りの建造物の場合、壁も放射線遮蔽に有効です。汚染土壌を埋設するなら、窓のない方向の庭に埋設すると室内に貫入するガンマ線をより減少させられるでしょう。

大切なのは、保管前後に実際に居住部（保管場所に最も近い生活部分屋外）の線量率増加を線量計で測定して、本当に安全かどうかを確認する事です。これは、線量計さえ有れば簡単に測定して判断できることです。もし線量率低減不十分と判断されれば、さらに距離を取るか遮蔽物（水入りポリタンクや土嚢等）を増やすなどの対処をします。

以上はあくまでも行政側の汚染土壌管理体制が整うまでの仮の一時的保管法です。行政機関には、できるだけ早期に十分な規模の管理施設を確保してもらいたいと思います。

・一時保管法のまとめ
「人間が長時間生活する場所からなるべく距離を取り」、「汚染土壌を収納した容器ごと土中に埋設」するか「倉庫や地下室に保管し周囲を水入りポリタンクや土嚢で囲む」ことで、外部被曝増加を最小に抑えた上で内部被曝の危険をほぼ完全に抑制できます。

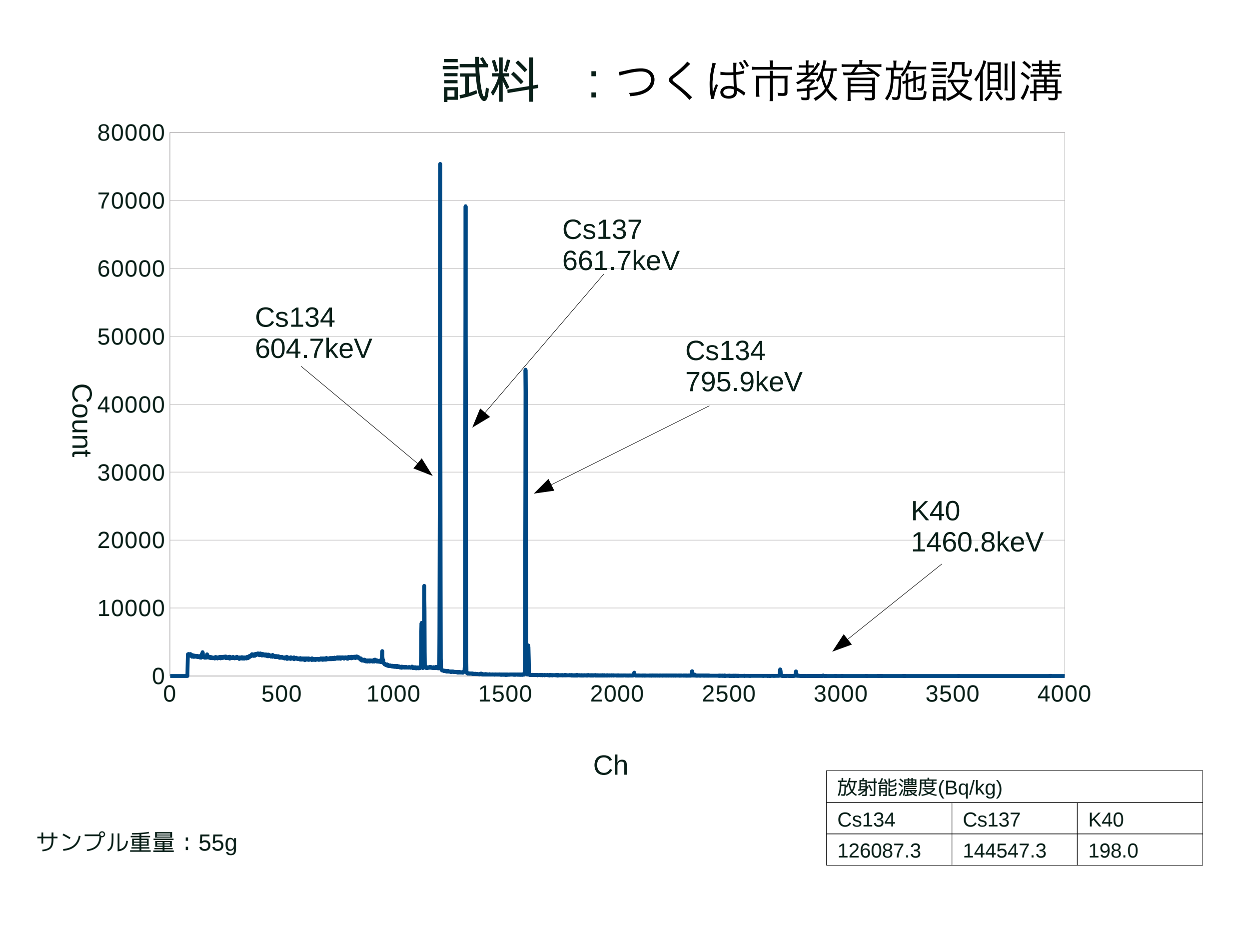
謝辞

本資料は、著者・新田が作成しましたが、その内容は、グループ内での情報交換によって完成度が高められたものです。特に牧野淳一郎および匿名のシニア学者のコメントは常に有用でした。核種解析用機材の調達／設置および非常に時間と手間のかかる核種解析と汚染濃度の定量は全て大嶋晃敏が多忙な業務の合間を縫って担当しました。情報公開用 Web サイトの設定は三好真が担当しました。第 4 章の土壌質量密度の見積もりに関しては、本資料 ver.2011.11.8 をご覧になった辻野匠氏 (地層学) からのご指摘によって常識的な値を押さえる事ができたことを明記します。本資料には、グループメンバーが別個に情報収集や議論のなどの対外活動を行った成果も集約されています。核種解析のための大掛かりな機材導入には、多数の方々のご協力がありました。情報提供してくださった方々、機材導入に尽力してくださった方々の全てに本謝辞での氏名公開の許可を得る事は困難ですので、ここでは氏名不詳のままで感謝の意を表したいと思います。

付録

原発事故発生後１年が経過し、政府の示す諸基準値も、事故発生当初の暫定基準値から移行しつつあります。ここでは、これまでの我々の活動で得た知見を参考に、除染対象と判断するための 5cm 線量率 B の値を再検討する事にします。第２章の記載内容を参照しながらご覧になってください。

下準備として、円盤状の汚染土壌が存在する場合、その法線方向の対称軸上での線量率を見積もります。現在の主なガンマ線源となっている核種はセシウムの二つの同位体 134 と 137 です。図３は、つくば市内のある教育施設側溝の土壌サンプルを、我々の Ge 半導体検出器にて核種解析した結果です（表２中の「教育施設側溝」とあるもの）。



放射能濃度(Bq/kg)		
Cs134	Cs137	K40
126087.3	144547.3	198.0

図 3: 核種解析結果の例

横軸は検出されたガンマ線の光子エネルギー、縦軸は単位時間に検出された光子数（線量率に比例している）です。核種ごとに異なる光子エネルギーのガンマ線を放射するので、このグラフから、サンプル中にどのような放射性核種がどれだけの量含まれているかが分かるのです。図３から分かるように、今回の原子力発電所事故による汚染では、セシウム 137 の顕著な輝線（光子１個あたりのエネルギー 661.7 keV）の両脇に、セシウム 137 輝線と凡そ同じ強度（桁違いではない程度に）でセシウム 134 の二つの輝線（光子１個あたりのエネルギー 604.7 keV と 795.9 keV）が見られます（核種ごとの存在比は、新しい核燃料を入れてからの原子炉の運転時

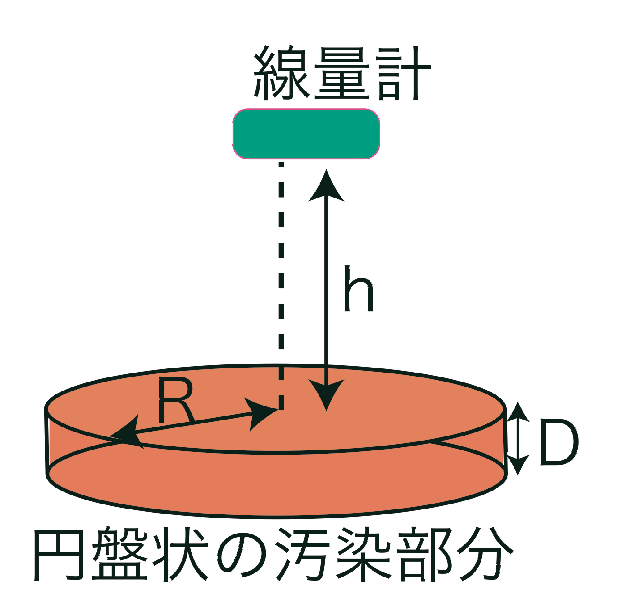


図 4: 円盤状汚染のモデル

間によって経時変化します）。これら以外のエネルギーのガンマ線は非常に弱いので、ここでは簡単のために、これら３本の輝線のみを考えます。厳密に言うなら、これら３本の輝線でも、それぞれの光子エネルギーが多少異なっています。そのため、人体が吸収する効率（吸収線量率）が少し異なります。しかし、これら３本の輝線のエネルギーは大きくは異ならないので、ここでは上記の田崎氏の資料に倣って、中央にあるセシウム 137 からのガンマ線で代表させて計算します。

以下では、単純なモデルとして、地表付近の半径 10cm、厚さ 3cm の部分が一様な濃度で汚染されている状況を考えます（図４）。これは、雨樋の吐出口付近にできるミニホットスポットの典型的モデルです。この円盤状汚染部分の中心軸に沿っての地上高 5cm での線量率を求めます。汚染された土壌の層が薄い上に、地面至近での線量率に興味が有るので、土壌や空気による放射線減衰を無視します。まず、円盤の厚さが無限に薄い面状分布の場合の線量率は次のように求められます（田崎氏資料の式 (4.3) より）。

$$F = \frac{\hbar\omega\zeta\eta\sigma_{rad}}{4} \ln\left(\frac{R^2+h^2}{h^2}\right) \tag{1}$$

ここで、$\hbar\omega$ はガンマ線光子のエネルギー（セシウム 137 からのガンマ線光子エネルギーで代表させる）、ζ は人体の吸収線量率（水の値で近似する）、η は 1 回の崩壊で放出される平均光子数、σ_{rad} は汚染面密度、R は円盤状の汚染領域の半径、h は測定点の地上高（円盤からの距離）です。次に、厚さ D の円盤状の土壌が一様に汚染されている状況を考えます。上式の汚染面密度 σ_{rad} を汚染濃度（放射性セシウムの質量密度）ρ_{rad} を用いて書き換えると

$$\sigma_{rad} = \rho_{rad}\rho D$$

となります。ここで ρ は土壌の質量密度です。これらの結果を応用して、地上高 h での線量率 F を求めると、単純な積分計算から以下のように得られます。

$$F = \frac{\hbar\omega\zeta\eta\sigma_{rad}}{4D} \int_0^D \ln\left(\frac{R^2+(h+x)^2}{(h+x)^2}\right) dx$$

$$= \frac{\hbar\omega\zeta\eta\rho_{rad}\rho}{4}\Bigg(-2R\tan^{-1}\frac{h}{R} + 2R\tan^{-1}\frac{D+h}{R}$$
$$-h\ln\frac{h^2+R^2}{h^2} + (D+h)\ln\frac{(D+h)^2+R^2}{(D+h)^2}\Bigg) \quad (2)$$

次に、上記の結果に次の数値を代入します。光子エネルギーに吸収線量率を掛けた値 $\hbar\omega\zeta = 3.5\times10^{-16}$ (Sv m^2)、１回の崩壊で放出される平均光子数 $\eta = 0.85$ とします（これらは田崎氏資料と同じ値）。汚染土壌の質量密度を $\rho = 1.5\times10^3$(kg/m^3) とします（第 4 章参照）。汚染部分半径 $R = 0.1$(m)、汚染部分厚さ $D = 0.03$(m)、測定点の地上高 $h = 0.05$(m) とします。表 4 では、この円盤状のモデルに従って、汚染濃度 ρ_{rad} のいくつかの値に対する地上高 5cm での線量率 $F(h = 0.05[\mathrm{m}])$ を示しました。比較のために、地上高 $h = 1$(m) での線量率 $F(h = 1.0[\mathrm{m}])$ も併記しました。

表 4　円盤状汚染（半径 10cm、厚さ 3cm）での地上高 5cm 線量率

汚染濃度 (Bq/kg)	8,000	10,000	33,600	50,000	67,300	100,000	200,000	300,000
5cm 線量率 (μSv/h)	0.119	0.149	0.500	0.743	1.00	1.49	2.97	4.46
1m 線量率 (μSv/h)	0.0009	0.0012	0.0039	0.0058	0.0078	0.012	0.023	0.035

注）これは円盤状の汚染土壌のみからのガンマ線線量率である。実際の測定時には、上表の線量率に背景の線量率が加わる

実際の測定時には、上表の線量率に背景の線量率が加わることに注意してください。例えば、測定している区画での代表値 A（第 2 章参照）が 0.1(μSv/h) である場合、33,600 (Bq/kg) の汚染土壌からなる上記の円盤状ミニホットスポットの 5cm 線量率の測定値は 0.1(μSv/h)[背景]+0.5(μSv/h)[ミニホットスポット寄与分]=0.6(μSv/h)[測定値] となります。

このモデルでは、埋め立て処分可能な上限である 8,000 (Bq/kg) でも汚染土壌からの 5cm 線量率は 0.12 (μSv/h) 程度に過ぎません（測定値は、これに背景線量率を加えたものとなる）。ホットスポット周辺地域では、地上高 1m でもこの程度の線量率の場所は頻繁に見られますので、背景の線量率が高い場合にミニホットスポット寄与分が埋もれてしまうと、埋め立て処分の出来ない濃度のミニホットスポットでも、5cm 線量率だけで検出するのは困難です。まして、地上高 1m での線量率測定では、検出はほとんど不可能である事も分かります。

本資料第 2 章で推奨した基準の 5cm 線量率 1 (μSv/h) は 67,000 (Bq/kg) と、相当の高濃度に対応することがわかりました。ここまで高い基準値ならば見逃す事は無いでしょうが、基準が高すぎて、危険を残してしまう恐れもあります。そこで、次のように基準を見直す事を提案します。

『5cm 線量率測定値 $B \geq A + 0.15$(μSv/h) の時には、危険と見なし除染対象にする。』

これは、10,000 (Bq/kg) 程度以上のミニホットスポットを除染対象にすることに対応しています。A が背景分の線量率を表し、0.15 (μSv/h) が上記モデルでの 10,000 (Bq/kg) の汚染からの線量率を表します。つまり、『背景分を除く 5cm 線量率から、直下に 10,000 (Bq/kg) 程度以上の高濃度汚染土壌の存在が推定される』という意味です。例えば、背景の線量率が A=0.15 (μSv/h) の地区であれば、$B \geq 0.3$ (μSv/h) が除染基準と言う事になります。ただし、同じ汚染濃度であっても、汚染領域の面積、厚さや形状によって 5cm 線量率はかなり変化しますので、

あくまでも目安と捉えてください（表2参照）。このように、5cm 線量率のみの情報から汚染濃度を正確に知る事は出来ません。5cm 線量率について除染の基準値を決める事には、このような不定性が残される事に注意してください。

以上の議論をまとめると表5のようになります。

表5　ミニホットスポット検出法（改訂版）

5cm 線量率 B (μSv/h)	1m 線量率 C と周辺線量率 A の比較	判定
$B \geq A + 0.15$	$C < 2A$	狭いミニホットスポット（数十 cm 四方程度以下）
$B \geq A + 0.15$	$C \geq 2A$	広いミニホットスポット（数 m 四方の可能性有り）
$B < A + 0.15$	—	汚染濃度は低い（要経過観察、例外有り）

ホットスポットと認定されているような地域では、背景線量率 A が 0.15 (μSv/h) を大きく上回る場所は沢山有る事でしょう。そのような地域では、$B \geq A + 0.15$(μSv/h) となる場所は無数に検出されるはずです（そもそも A と B の 0.15 (μSv/h) の差は背景に埋もれてしまい検出できないこともあるでしょう）。つまり除染すべき高濃度汚染（≥10,000 (Bq/kg)）の場所が無数に存在していると言う事です。そのような場合、市民が除染するのは非常に困難かつ危険です。除染作業が土木事業並みに大掛かりになってしまいますし、除染した大量の土壌の管理も非常に困難で、十分な放射線遮蔽が出来ないと集積した汚染土壌からの外部被曝の危険も大きくなります。そのような場合には、市民による除染ではなく、行政主導での除染が実現されるよう、行政機関に訴える行動を起こすべきです。本資料は、元々ホットスポット「周辺地域」での危険を低減させる目的で作成していますので、ホットスポット「内部」での除染の指針としては限界がある事をご了承ください。例えば、東京都豊島区議会議員である橋本久美氏らの活動は、市民が行政機関と協力し合って除染する際の参考となると思います（http://ameblo.jp/hashimoto-kumi/）。

環境省は、2012 年 3 月 12 日に、やっとミニホットスポットに対する指針を提示しました。「地上高 1m での線量率が周辺より 1(μSv/h) 以上高いこと」が対処の必要なミニホットスポットの目安とされています。これまでの基準同様に、「立った姿勢での成人が受ける外部被曝のみ」を考慮して基準を設定していると思われます。しかし、地上高 1m での線量率が低く外部被曝の危険は低いとしても、高濃度に汚染されたミニホットスポットからの内部被曝の危険は残ります。上記のモデル計算にしたがうと、「地上高 1m での線量率が 1(μSv/h)」とは、「汚染濃度 859 万 (Bq/kg)」という、著者等が体験した事の無い、凄まじい高濃度汚染に対応します。雨樋吐出口付近に出来るような極小サイズのミニホットスポットの場合には、地上高 1m での線量率では危険性を判断できない事を再度強調しておきます（だからといって、内部被曝の危険が無い訳ではありません！）。上記の表または式を参照して、5cm 線量率がある程度以上高い時には、やはり除染等の措置が必要と思います。

正確な方法とは言えませんが、この結果を応用した汚染濃度の推定法を紹介します。ミニホットスポット候補地の土壌を、半径 10cm、厚さ 3cm の円盤状容器にサンプル採取して、出来るだけ外部からの放射線を遮蔽（第4章参照）した上で、5cm 離れた位置での線量率を測定すれば、表4を参照して大まかな汚染濃度を知る事は出来るかもしれません。実際に使う容器のサイズに合わせて、式 (2) に代入する R、D、h の値を調整してください。通常の関数電卓（逆三角関数や対数関数の計算が出来るもの：著者の知る関数電卓ではどれでも計算可能）で簡単に計算できます。